

Korszerű, önkenő műszaki műanyag kompozitok tribológiai kutatása dinamikus mozgás és terhelési rendszerekben, dinamikus tribométer modulrendszerű továbbfejlesztése.

A kutatási program megvalósítása megfelelt az eredeti fő elképzeléseknek, mind a tribológiai anyagvizsgálatok, mind pedig a dinamikus tribométer fejlesztése megtörtént. A program végrehajtásának mérföldkövei és eredményei a következők:

Előzmények:

A program résztvevő személyei négy kutatóhely dolgozói három országból (magyar- belga- román). 15 éve dolgozunk folyamatosan együtt a tribológia szakterületén, több nemzeti és nemzetközi kutatási programot sikeresen valósítottunk meg. Eddigi kutatási eredményeink ismertekké váltak világszerte. Az eredmények folyóiratok, konferenciák és szakkönyv fejezetek mellett oktatási tananyagokba épültek be, mérnöki tervezési adatbázisokat hoztak létre, új konstrukciós megoldások születtek ipari cégeknél és anyagvizsgáló berendezések fejlesztése történt meg. Erre a háttérre, egy korábbi OTKA program (T32590) folytatásaként indult a jelen kutatási projekt a nemzetközi együttműködésre alapozva.

I. Polimer tribológiai kutatások, mérések. A legújabb műszaki műanyagok és kompozitjaik súrlódási és kopási viselkedését kutattuk acél és DLC felületeken, a tribológiai eredményeket összehasonlítottuk a már ismert polimer anyagok jellemzőivel.

Végrehajtás lépései:

a.) Anyagkiválasztás

A poliamid 6 (PA6) és kompozitjai igen gyakran használt szerkezeti anyag csúszó rendszerekben, az esetek többségében külső kenés alkalmazásával. Ezért referencia anyagként öntött poliamid 6 - kétféle gyártástechnológiával, Mg és Na katalizálással – anyagok kerültek kiválasztásra. Az új anyagok egy részének kiválasztása a csapágygyártók és felhasználók kívánságának figyelembe vételével történt, valamint a műanyaggyártók ajánlásai, fejlesztési trendek voltak meghatározók. A főbb vizsgált anyagcsoportok a referencia anyagokon felül:

- PA kompozitjai (PA6G/Mg-Bg, PA6G/Mg-olaj, PA 66G-GF30)
- PETP és kompozitjai (PETP/PTFE, PETP/PE)
- PPS és kompozitjai PPS/GF/lub
- PEEK és kompozitjai, PEEK/GF, PEEK/BG, PEEK/CA, PEEK/CA/lub
- PAI és kompozitjai, PAI/lub, PAI/GF, PAI/CA
- Többrétegű, „multi-layer” felületi bevonatok

b.) Mechanikai tulajdonságok meghatározása

A kiválasztott anyagok alapvető mechanikai jellemzői (szilárdság, keménység, szívósság) meghatározásra kerültek. A vizsgálatok részben Gödöllőn, Budapesten, részben pedig Gentben és Tielben történtek.

c.) Kisméretű próbatest vizsgálatok

A program első lépéseként a kisméretű próbatest vizsgálatokat végezzük el. Ehhez rendelkezésre áll Gentben a "PLINT reciprocating tribotester", Gödöllőn a folyamatos és

dinamikus "pin- on-disk", Budapesten "block-on-cylinder" berendezés. A vizsgálatok egyik anyaga a választott csapágyanyag, a másik felület referenciaként 42CrMo4 acél (HB 300 és Ra 2 μ m), valamint a PLINT reciprocating rendszerben DLC bevonatot is kutattunk.

Először alacsony csúszási sebességek mellett került vizsgálatra a rendszer, különböző névleges felületi nyomások beállítása mellett. Meghatározásra került az a kritikus nyomásérték, mikor az Archard-féle kopástényező hirtelen növekedni kezd.

Ezután a névleges kritikus sebességek lettek meghatározva különböző terhelési szintek esetén. A dinamikus hatások modellezéséhez több rendszert is fejlesztettünk.

- A kisméretű próbatestek első dinamikus vizsgálati rendszere egy átalakított pin-on-plate mérési rendszer, ahol a műszaki műanyag minta (pin) egy előre programozott dinamikus hatásokkal teli (gyorsítás, lassítás, inercia erők irányváltásoknál, változó normálterhelés) pályán sűrűlódik.
- Műszaki műanyag fogaskerekek fogsűrűlódási veszteségeinek feltárásához először teljes fogaskerekes vizsgálati rendszert terveztünk (modul $m=1,25$, fogszám $z=36$), majd az eredmények elemzése elvezetett oda, hogy meg kell ismerni egy fogpár legördülő csúszása során létrejövő pontos sűrűlódási folyamatot. Erre vonatkozóan a szakirodalom csak elméleti számítások alapján rajzolt függvényeket szolgáltatott.
- Megterveztük a fogprofilon ébredő sűrűlódás mérésének módszerét. Ez lehetővé tette nagyméretű (modul=10) fogak esetében a kapcsolóvonal menti fogsűrűlódás mérését. Ez a rendszer már átmenet a kisméretű minta vizsgálatok és a dinamikus modellezés részét képező az előző pontban említett polimer és kompozit alapanyagú, evolvens profilú valódi fogaskerekes sűrűlódási és kopási vizsgálatok között. A fogaskerekek sűrűlódását és kopását vizsgáltuk tisztán adhéziós és abráziós körülmények között is. Ennek a jelentősége ipari alkalmazás szempontjából óriási, mivel a polimer fogaskerekek pont azokon a gépészeti helyeken használatosak, ahol valamilyen okból (pl. környezetkímélés) kenőanyagmentes üzemben használják a polimer fogaskerekeket. Kutatásainkkal feltérképeztük az egyes fogaskerek anyagpárosítások kopási és sűrűlódási viselkedését, valamint rámutattunk a hajtások hatásfokváltozásának tendenciáira. Ez egy új tervezési illetve anyagkiválasztási szempont a polimer fogaskerekes hajtások tervezéséhez kapcsolódóan.
- A kisméretű minta kutatási rendszerben egy teljes alprojectet képviselt a nagytisztaságú UHMW-PE HD-1000 anyagok orvosi implantátumként való alkalmazásánál felmerülő abrázív és abrázív-erózió hatásának laboratóriumi tisztázása. A mérési eredmények publikációkban megjelentek.
-

d.) Nagyméretű próbatest vizsgálatok

A vizsgálóberendezés alapváltozata - 6.5 MN tribométer - Európában csak a Genti Egyetemen létezik. Az alapgépet átépítettük időközben egy új felépítménnyel, mely a dinamikus modellezés alapjait képes megvalósítani. A korábbi vizsgálatok alapján megállapítható, hogy 150 órás teszt szükséges a kezdeti "running-in" és a stabil "steady-state" kopási szakaszok értékeléséhez. A kisméretű próbatest vizsgálatokkal meghatározott névleges terhelések és 6 mm/s csúszási sebesség mellett, a kiválasztott anyagok sűrűlódási és kopási viselkedése került feltérképezésre. A sűrűlódás mérése a berendezés erőmérőivel, a kopás mérése pedig a méretváltozások és tömegváltozások meghatározásával került megvalósításra. A tipikus kopásmegjelenési forma SEM és FESEM technikával került / illetve kerül (még folyamatban) megvizsgálásra. A tribokémiai folyamatok EPMA és XPS technikával kerültek / kerülnek meghatározásra (folyamatban).

Mindezek alapján a kopás, kopássebesség, súrlódás változása és a domináns kopási mechanizmus került / kerül meghatározásra.

e.) Túlterhelési vizsgálatok

Bizonyos szerkezetekben, (pl. lift technika) főleg a nagyértékű, nagyméretű berendezésekben fokozott biztonság és túlterhelés elleni védelem szükséges. Ha a túlterhelés mégis bekövetkezik, akkor a szerkezet tönkremenetelének törvényszerűségét ismerni kell. Ezért a kiválasztott anyagok a kritikus névleges terhelhetőségük 200%-án kerülnek vizsgálatra, és a kopási, tönkremeneteli folyamat kerül meghatározásra. (kopás, repedés, törés..stb).

Ennek a mérési programnak keretében kidolgoztuk a megvalósítás módszerét, és megépítettük a vizsgálópadot. 2006 év végén megkezdődtek a mérések, célszerűen túlterhelt műszaki műanyag / acél fogaskerék párosítások esetén. E részterület további kidolgozása a jelen kutatási program folytatása.

f.) Finoman köszörült felületek

Csapágyazásoknál a bekövetkező kopás mértéke gyakran csökkenthető a felületi érdesség csökkentésével, bár ez az esetek többségében a súrlódás növekedésével is jár. Ezekhez a vizsgálatokhoz Ra 0,5 µm felületi érdességű anyag kerül alkalmazásra. E méréssorozat a már említett DLC vizsgálatokhoz is használt PLINT recyprocating tribotesterrel történt, kisméretű mintavizsgálati program keretében.

g.) Fűtött felületek

Igen sok csapágyanyag (pl. a műszaki műanyagok) érzékeny a kontakt-hőmérsékletre. A HPM anyagok növelt hőállósággal rendelkeznek (200 - 400°C) a mechanikai tulajdonságaik tekintetében. Tribológiai jellemzőik e tartományban kevésbé ismertek, így fűtött rendszeri méréseket is terveztünk. A hőmérséklet nem csak a "steady-state" kopási folyamatot befolyásolja, de kihat az indulási, megállási állapotra is, és befolyásolja a stick-slip folyamatot is.

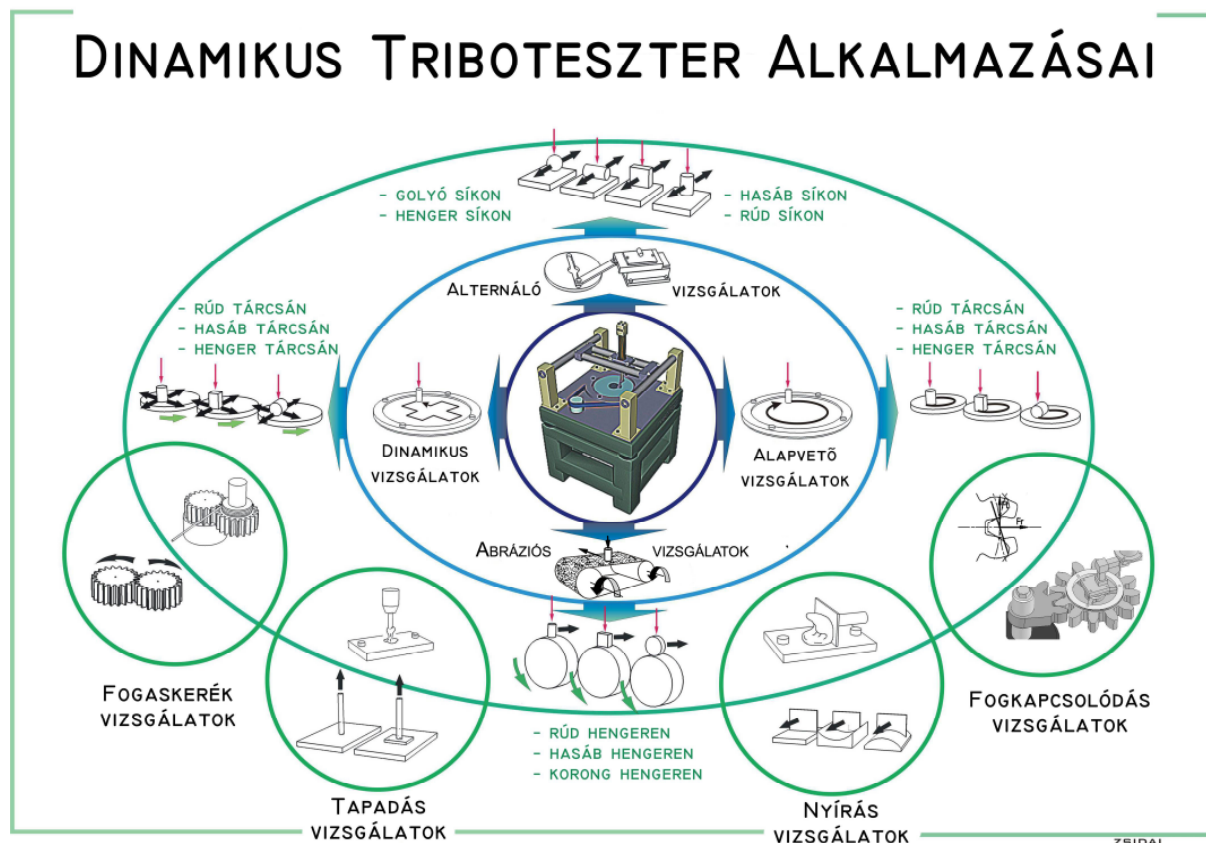
Az elképzeléseknek megfelelően a dinamikus tribométer (Gödöllő) pin-on-disc rendszerét átterveztük és átalakítottuk úgy, hogy a disc rész szabályozottan fűthető legyen. Az előzetes kisméretű minta vizsgálati eredmények azt mutatják, hogy ez egy teljesen új, ismeretlen terület lesz a polimer tribológián belül, melyet külön kell részletesen megvizsgálni. A fűtetlen rendszer eredményei és a fűtött modellek közötti trendek matematikailag egyenlőre nem leírhatók, korrelációt, függvénykapcsolatokat leírni nem sikerült. A súrlódási kontaktzóna hőmérséklet-faktorának változása komplex módon befolyásolta a végleges súrlódási-kopási jelenségeket (felületi alakváltozás, deformáció, a tényleges érintkezési zóna nagysága, azaz az ébredő adhézió a felületek között, az áttapadó polimerfilm szerepe az ellenfelületen, Hertz feszültségállapot időfüggősége cylinder-on-plate elrendezésnél), melyet egy további kutatási project, PhD téma hivatott tisztázni.

II. Moduláris rendszerben továbbfejlesztettük és építettük a dinamikus tribológiai anyagvizsgáló berendezésünket.

- A dinamikus tribométerhez (Gödöllő) új egységként a „pin-on-cylinder” és a „pin-on-plate” modult fejlesztettük ki egyedi funkciókkal és modellezési lehetőségekkel.
- Az alapgépre megterveztük és elkészítettük a polimer fogaskerék fogsúrlódásmérő modult valós gépelem alkalmazásával

- Megterveztük és elkészítettük a nagyméretű evolvens polimer fogaskerék fogak használatával megvalósítható, a kapcsolóvonal menti fogsúrlódás mérésének rendszerét.

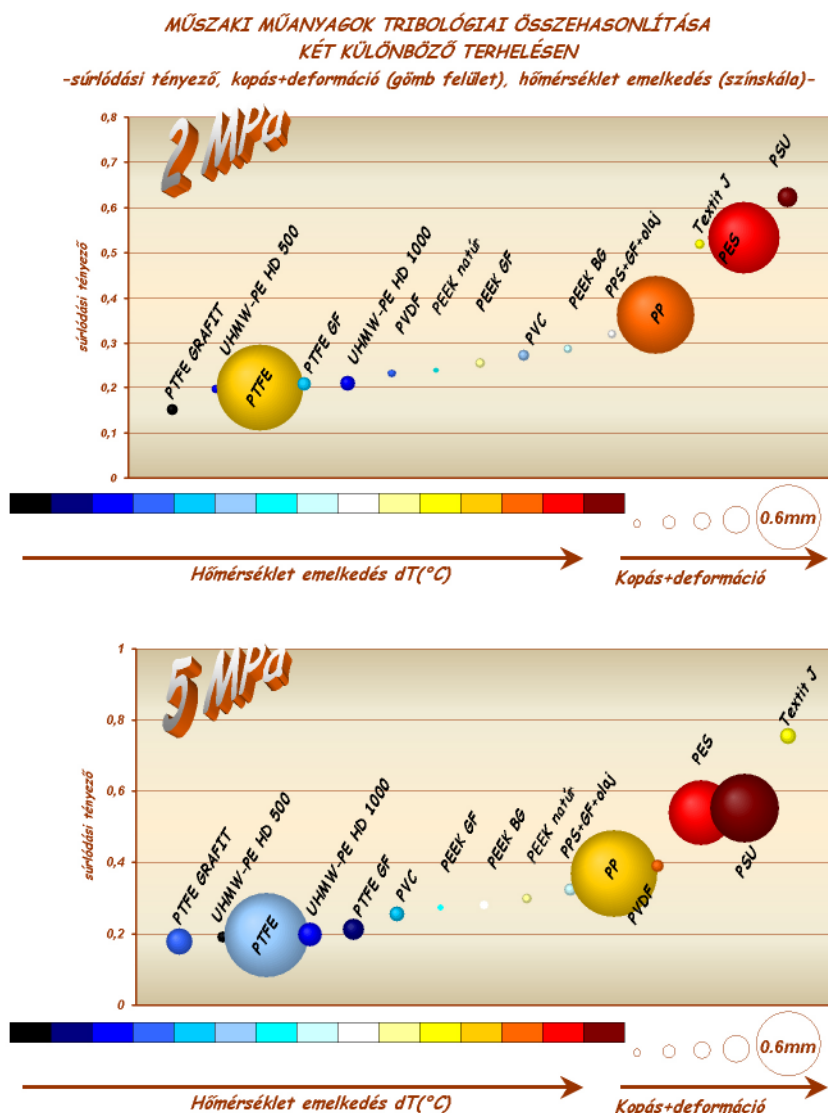
Jelen állapotában az elvégezhető tribológiai modellvizsgálatokat összegzi az 1. ábra.



1.ábra. A dinamikus tribológiai anyagvizsgáló fő moduljai

Eredmények összegzése és publikálása

Az elvégzett kutatási tevékenységgel a csúszósúrlódási igénybevétel esetén kutattuk a korszerű polimer kompozitok és nagyteljesítményű polimerek (HPM) alapvető tönkremeneteli folyamatának meghatározását. A kutatás kiterjedt egyes anyagok optimális üzemi körülményeinek meghatározására, figyelembe véve az alkalmazásoknál tapasztalható növekvő fajlagos terheléseket, de a túlterhelésekkel szembeni biztonságra vonatkozó szigorodó feltételeket is. A kutatási munka eredményeként osztályoztuk az önkenő szerkezeti anyagokat több szempontból is: (károsodási, kopási mechanizmus, PV- limit, súrlódási tényező, stick-slip viselkedés, túlterhelési viselkedés). Kiragadott példaként ipari hasznosításra átadott „felhasználóbarát” megjelenítést mutat a 2. 3. és 4. ábra.

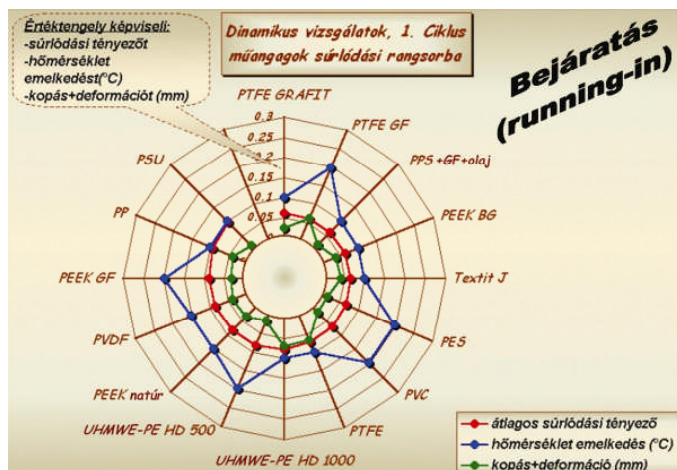


2.ábra. Példa a felhasználói adatbázisból, két jellegzetes terhelési szintre, pin-on-disc rendszerben

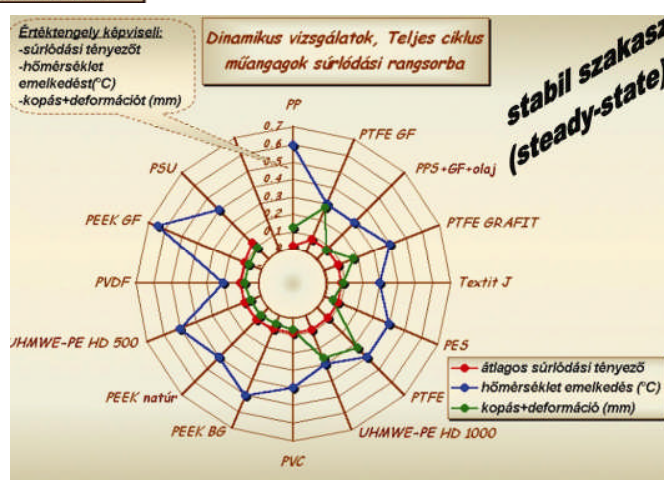
Az anyagok kopásrezisztenciájának értékelése a mennyiségi értékelés mellett kiterjedt a felület minőségi értékelésére is. A kisméretű és a nagyméretű próbatest vizsgálatok eredményei alapján történt korrelációkeresés a vizsgálati rendszerek között. (Zsidai László PhD dolgozat, 2005)

Külön hangsúlyt fektettünk a dinamikus hatások modellezésén alapuló tribológiai értékelésre, a mechanikai és tribológiai jellemzők rendszerteknikai kezelésére.

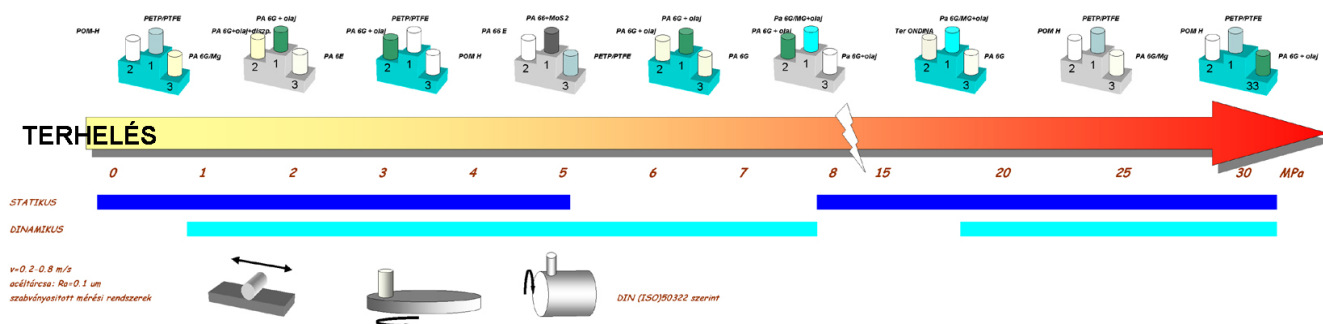
Ezek alapján egy olyan modern anyagkiválasztási és tervezési tribológiai adatbázist hoztunk létre, mely komplex módon kezeli az anyagjellemzők mellett az üzemi hatásokat és jellemző méreteket.



3.ábra. Példa a felhasználói adatbázisból, dinamikus hatások alatt, bejáratási állapot



4.ábra. Példa a felhasználói adatbázisból, dinamikus hatások alatt, stabil súrlódási szakasz



4.ábra. Példa. Egy tribológiai rangsor, több vizsgálati rendszer alapján

Az eredményeket és téziseket folyamatosan publikáltuk és átültettük a mérnöki gyakorlatba és oktatásba, segítve az aktív mérnököket egyetemi hallgatókat.

Ennek kapcsán hazai és nemzetközi konferenciákon workshop-okon publikáltuk folyamatosan az eredményeket. A legrangosabb nemzetközi szakfolyóiratokban is elkezdődtek a cik megjelenetések, de az átfutási idők miatt 1 év átlagos fáziskéséssel számolhatunk.

Ki kell emelni a cikkek mellett a Washingtonban zajlott III. World Tribology Congress, WTC Washington (harmadik világ tribológiai kongresszus), ahol az egyetlen magyarországi szóbeli előadás a projektből került ki.

További fontos tudományos eredmények, hogy a kutatási program egyes részfeladatait önállóan kezelő kutatók a projekt eredményeiből fogalmazott téziseikkel PhD fokozatot szereztek: Zsidai László 2005-ben Gödöllőn („Műszaki műanyagok tribológiai kutatása különböző rendszerekben”), Eberst Ottó 2005-ben Gödöllőn – Baia Mare nemzetközi PhD („Műszaki műanyag fogazott hajtások tribológiai kutatása”), Wouter Ost 2006-ban Gentben, Pieter Samyn 2007 februárban Gentben.

Keresztes Róbert pre-doktor 2007-ben védi PhD munkáját a dinamikus tribológiai rendszerek mérési eredményeiből Gödöllőn.

Szabadalom

A program végső szakaszában a kopásállóság növelési lehetőségek és tribológiai értékelés (modellezés) kapcsán kialakult további szakmai kooperáció (MTA KKKI) eredménye egy bejelentett szabadalom (2007 február):

„Eljárás oxigén és/vagy halogén heteroatomot tartalmazó, hőre lágyuló műszaki műanyagok mechanikai és tribológiai jellemzőinek javítására”

Reg.: P0700129

További eredmények

- Kapcsolat rendszerek

A kiszélesedett kutatásnak köszönhetően további kutatói kapcsolatok alakultak ki. Az eredmények ipari hasznosításának lehetőségeit segíti az elő kapcsolatrendszer. Érdeklődő, támogató ipari partnereink a témakör továbbvitelére kutatási és anyagfejlesztési pályázatokat nyertek 2006-ban (nyertes GVOP 3.3 illetve INNOCSEKK programok nano- illetve mikro kompozit anyagok fejlesztésére öntött poliamid 6 alapmátrixon).

- Workshopok

A program ideje alatt több alkalommal szerveztünk szakmai workshopokat, melyekhez csatlakoztak más kutatócsoportok illetve ipari cégek képviselői is.

- Ipari és oktatási hasznosítás

Az eredmények elérését magyar oldalról az alap OTKA támogatás mellett a TÉT nemzetközi kutatói mobilitási programja és ipari cégek is segítették. Az utóbbiak a műszaki műanyagok gyártásában és ipari felhasználásában közvetlenül hasznosítják a kutatási eredményeket.

Az oktatás terén a műszaki felsőoktatási intézmények szintén hasznosítani tudják a felhasználó-centrikus tribológiai ismereteket a műszaki műanyag és kompozit anyagokról.

Köszönetnyilvánítás

A programban résztvevő magyar, flamand és román kutatók ezúton is kifejezik köszönetüket a támogatásért, ami a 15 évvel ezelőtt megkezdett közös szakmai munka hatékonyságát javította jelentősen az elmúlt két évben. A kooperáció sikeres eredményei a tovább szélesedő nemzetközi együttműködést erősítik.

Megjegyzés

A csatolt publikációs jegyzékben az impakt faktorok kezelése nem egyértelmű, mivel a gépészeti- tribológiai szakterületen sem a magyar, sem a nemzetközi vonatkozásban nincs egységes, meghatározott elv és tradíció.

Az általunk megadott pontértékek a MAB által elfogadott doktori és habilitációs szabályzatok magyarországi pontrendszerét veszi alapul (ahol a szoftver engedi).